

面向电动汽车快充站服务效率的自适应动态激励机制

李飞^{1,2}, 梁宝全², 张旭东², 王鸿奎², 孙毅¹, 牟明亮¹, 李泽坤¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050000)

摘要:快充站是电动汽车(EV)大规模普及情况下的重要建设方向,站内充电设施的利用情况直接决定了充电桩的运营收益。EV充电后期的功率衰减将引起站内慢功率运行的集群效应,影响快充站的整体盈利效率。基于此,根据站内不同的充电设施裕度情况,提出了EV差异化服务费激励机制,引导用户改变自身的充电需求,在保证用户满意度的情况下,提高快充站的经济效益和充电桩利用率,实现快充站服务能力的最大化。基于仿真算例验证了所提自适应动态激励机制能够有效提高快充站的经济效益和用户满意度。

关键词:电动汽车;快充站;充电设施裕度;功率衰减;差异化激励;经济效益;用户满意度

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112002

0 引言

近年来,电动汽车EV(Electric Vehicle)的规模不断增长,但充电桩数量以及充电时间始终是限制EV发展的重要影响因素,因此,建设具备快速充电能力的充电桩(即快充站)是未来发展的重要方向^[1],而如何对快充站内的充电EV进行充电引导、合理调度成为了重要的研究课题。

站内设置面向用户的灵活激励策略,既能保证用户充电有序进行,又能提高快充站运营商的经济效益。现有的快充站定价策略大多采用相对固定的服务费机制,在这种情况下用户习惯于采用“电量充满”和“整钱充电”的方式。但是考虑到EV充电功率(尤其是在快充方式下)存在明显的功率衰减现象^[2],若采用“电量充满”或“整钱充电”方式,会降低充电后期充电桩的利用率。在充电桩业务比较繁忙的时段,充电后期因功率衰减导致充电桩利用率较低,会增加部分EV低功率充电的时间占用成本,进一步导致快充站整体的服务能力降低,对快充站的运营效益造成损失。

相较于固定电价机制,部分研究以实时电价和分时电价2种方式实现充电站运营效益的提升,同时对充电的有序性进行了优化,如:文献[3]提出了双层定价策略,下层模拟分销市场的清算,上层考虑充电站运营成本和电网潮流变化等因素制定了充电实时电价;文献[4]通过对一天内EV充电负荷的峰谷时段进行确定,以全天峰谷差最小为目标制定了

EV充电峰谷电价;文献[5]以配电网运行成本和用户充电成本最小为目标对配电网和用户进行主从博弈,在实现配电网负荷削峰填谷的同时保证了配电网和用户效益最优;文献[6]通过分析EV可调节潜力与用户心理,结合积分制和分时电价,在降低电网投资成本和负荷峰谷差的同时减少了用户的充电费用;文献[7]提出了一种在线维克瑞-克拉克-格罗夫斯VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖机制,所有用户的充电费用均在一天结束后由快充站根据当天充电负荷对配电网的影响程度以及快充站的经济效益进行确定,该机制能够很好地实现快充站与用户效益的最优,但是充电前用户对充电费用的不可知性降低了用户参与响应的概率;为了解决用户充电费用不可知的问题,文献[8]提出了基于合同的在线定价方法,综合考虑了EV充电需求以及离场时间,并根据快充站在不同时刻的购电成本,为用户制定了多个充电合同,方便用户根据自身需求选择合适的充电合同,实现快充站效益和社会效益的最大化。

上述研究所提价格激励方法均对配电网的削峰填谷、快充站以及用户的经济效益有一定的提升作用,但大多假设在EV调度过程中充电设施数量充裕,未考虑高速公路等EV充电密集场景^[9],而在EV充电密集场景下时常会遇到充电设施裕度不足的问题,部分EV需要等待接入充电系统。文献[10]考虑了充电设施数量的有限性,但仅对恒功率阶段的EV进行调度,未对功率衰减阶段的EV进行考虑,这就造成了很大一部分EV资源的浪费,未能实现快充站经济效益的最大化。本文在国内外有关EV充电激励策略研究的基础上,结合文献[11]所提用户差异化控制理念,进行了以下两方面的研究:①在考虑快充站充电设施裕度的前提下,根据快充站的运行状态以及EV的快充特性,为EV用户提供差异化服务费激励机制,引导用户在快充站忙碌时降低充电需

收稿日期:2021-04-27; **修回日期:**2021-10-12

基金项目:国家电网公司科技项目(低压用户负荷感知、测量和调控关键技术研究及应用)(SGHEDK00DYJS2000044)

Project supported the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research and Application of Key Technologies for Low-voltage User Load Sensing, Measurement and Regulation)(SGHEDK00DYJS2000044)

求,在快充站空闲时增加充电需求;②基于EV充电后期的功率衰减特性,充分考虑充电后期EV对充电桩的时间占用成本与用户时间成本,在快充站忙碌时通过提高充电服务费以抵消充电桩时间占用成本,在快充站空闲时通过降低充电服务费以抵消用户时间成本。

1 快充站充电机制及菜单模型

1.1 快充站与EV信息交互架构及充电机制

由于快充站内充电桩资源的限制,对于快充站内具有充电需求的EV集群而言,可根据充电状态将其划分为等待队列和充电队列。其中,等待队列包括已经进入快充站但需要等待一段时间才能接入充电系统的EV,以及未来一段时间内可能会到达快充站的EV;充电队列包括当前时段已接入充电系统的EV。考虑到进入快充站的EV用户一般为时间敏感型用户,因此本文不考虑EV的间歇性充电,所有EV从接入充电系统开始至达到期望状态一直保持充电状态。

快充站与EV用户的信息交互架构如图1所示。快充站首先判断上一时段充电队列中是否有完成充电的EV,若有新的充电桩被释放,则从等待队列中选择优先级最高的EV接入充电系统。此时快充站会首先采集当前状态下充电队列的相关信息,包括当前荷电状态以及充电结束时间,同时利用大数据分析、蒙特卡洛等方法对未来一段时间内的接入EV数量进行预测^[12],进而确定等待队列队长,判断当前时段内快充站的运行状态,确定当前时段内的充电服务费价格,并为当前接入充电系统的EV提供充电菜单(包括期望离场荷电状态 $S_{le,i,k}$ 、充电所需时长 $t_{chg,i,k}$ 、充电等效电价 $p_{i,k}$,其中, i 为EV的编号, k 为充电菜单中的套餐编号, $k=1,2,\dots,Y$, Y 为套餐总数)。EV用户根据自身的出行需求从充电菜单中选择一种充电套餐并提交给快充站,快充站根据不同EV用户的充电需求为用户制定充电计划。

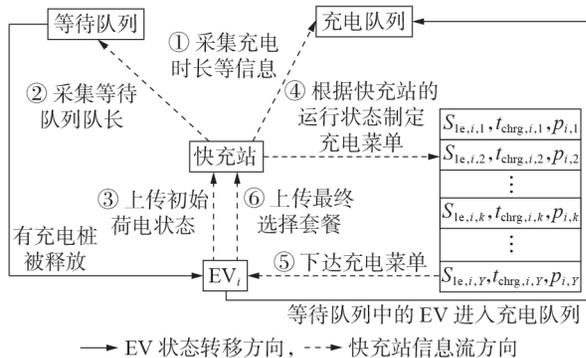


图1 快充站与EV用户的信息交互架构

Fig.1 Information interaction architecture between fast charging station and EV users

1.2 EV充电菜单模型

EV充电菜单中包含不同离场荷电状态下EV充电所需时长及其本次充电事件的平均电价(即充电等效电价),以 EV_i 为例具体说明如下。

1)计算 EV_i 充电所需时长时需要EV的充电功率特性进行分析。

由于 EV_i 大多采用恒流-恒压CC-CV(Constant Current-Constant Voltage)充电方式^[13](具体充电过程见附录A图A1):在恒流充电阶段,电池等效内阻较小,采用恒定大电流进行充电,充电功率基本恒定;当 EV_i 荷电状态达到阈值 $S_{th,i}$ 后进入恒压充电阶段, EV_i 的充电电流呈指数衰减,充电功率进入衰减阶段,出现明显的功率衰减现象^[14]。

EV_i 在充电过程中的功率 $P_{chg,i}$ 可表示为:

$$P_{chg,i} = \begin{cases} P_{max} & \text{恒流充电阶段} \\ P_{max} e^{-\lambda \left(t_c - \frac{S_{th,i} C_{bat,i}}{\eta P_{max}} \right)} & \text{恒压充电阶段} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_{bat,i}$ 为 EV_i 的电池容量; η 为EV的充电效率; λ 为充电功率衰减指数; P_{max} 为恒流阶段的充电功率,即最大充电功率; t_c 为已充电时长。

基于 EV_i 的期望离场荷电状态 $S_{le,i,k}$,可分以下2种情况对其充电所需时长 $t_{chg,i,k}$ 进行分析。

(1)若 $S_{le,i,k} \leq S_{th,i}$,则有:

$$t_{chg,i,k} = \frac{(S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{bat,i}}{\eta P_{max}} \quad (2)$$

(2)若 $S_{le,i,k} > S_{th,i}$,则有:

$$t_{chg,i,k} = \frac{(S_{th,i} - S_{st,i}) C_{bat,i}}{\eta P_{max}} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\eta P_{max}}{\eta P_{max} - \lambda (S_{le,i,k} - S_{th,i}) C_{bat,i}} \quad (3)$$

式中: $S_{st,i}$ 为 EV_i 接入充电系统时的初始荷电状态。

2) EV_i 的充电等效电价需根据 EV_i 期望离场荷电状态确定。

不同期望离场荷电状态下用户的充电成本 $C_{i,k}$ 如式(4)和式(5)所示。

(1)若 $S_{le,i,k} \leq S_{th,i}$,则有:

$$C_{i,k} = (p_{chg} + u_{cc})(S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{bat,i} \quad (4)$$

(2)若 $S_{le,i,k} > S_{th,i}$,则有:

$$C_{i,k} = (p_{chg} + u_{cc})(S_{th,i} - S_{st,i}) C_{bat,i} + (p_{chg} + u_{cv})(S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{bat,i} \quad (5)$$

最终可得到 EV_i 的充电等效电价 $p_{i,k}$ 如式(6)所示。

$$p_{i,k} = \frac{C_{i,k}}{(S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{bat,i}} \quad (6)$$

式中: p_{chg} 为快充站的售电电价; u_{cc} 为恒流充电阶段的服务费,即快充站为处于恒流充电阶段 EV_i 制定的充电服务费; u_{cv} 为恒压充电阶段的服务费,即快

充电站为处于恒压充电阶段EV_i制定的充电服务费。

2 快充站的多目标运营模型

快充站的运营过程主要以快充站的经济效益、EV用户的满意度和充电桩的服务能力三方面最优为优化目标。

2.1 快充站的经济效益

影响快充站经济效益 B_{ep} 的主要因素包括购电成本 C_e 、售电收益 R_e 、快充站日常运行的软硬件损耗成本 C_w (其值波动不大,本文视为常数),计算式为:

$$B_{ep} = R_e - C_e - C_w \quad (7)$$

$$C_e = \sum_{i=1}^N p_{\text{cost}} (S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{\text{bat},i} / \eta \quad (8)$$

$$R_e = \sum_{i=1}^N C_{i,k} \quad (9)$$

式中: p_{cost} 为快充站的购电电价; N 为快充站日服务EV数量。

2.2 EV用户的满意度

本文中的EV采用不间断充电方式,EV离场时均能达到期望荷电状态,因此EV用户的满意度主要体现在等待时长、充电等效电价2个方面,等待时长越短,充电等效电价越低,则EV用户的满意度越高。

EV用户等待时长的增加,会严重影响用户的充电体验,当用户等待时长超过30 min时,其在等待时长方面的满意度会降到极低^[15]。本文定义用户等待时长方面的满意度、充电等效电价方面的满意度分别为:

$$\begin{cases} U_{\text{sat}}^{\text{tw}} = \sum_{i=1}^N U_{\text{sat},i}^{\text{tw}} / N \\ U_{\text{sat},i}^{\text{tw}} = e^{-t_{w,i}/30} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_{\text{sat}}^{\text{p}} = \sum_{i=1}^N U_{\text{sat},i}^{\text{p}} / N \\ U_{\text{sat},i}^{\text{p}} = \frac{p_{i,k} - p_{\text{min}}}{p_{\text{max}} - p_{\text{min}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $U_{\text{sat}}^{\text{tw}}$ 、 $U_{\text{sat}}^{\text{p}}$ 分别为从快充站角度出发EV用户在等待时长、充电等效电价方面的整体满意度; $U_{\text{sat},i}^{\text{tw}}$ 、 $U_{\text{sat},i}^{\text{p}}$ 分别为从用户个体角度出发EV用户在等待时长、充电等效电价方面的满意度; $t_{w,i}$ 为EV_i的充电等待时长; p_{max} 、 p_{min} 分别为所有EV中充电等效电价的最大值、最小值。

2.3 充电桩的服务能力

充电桩的服务能力主要由充电桩的工作率和满载率2个方面体现,其中工作率是指在单位时段内工作的充电桩数量占快充站充电桩总数的比例,其值越高,则充电桩的利用率越高。定义充电桩工作率 C_{cp} 的计算式为:

$$C_{cp} = \sum_{j=1}^T \frac{N_{c,j} / N_c}{T} \quad (12)$$

式中: $N_{c,j}$ 为时段 j 工作的充电桩数量; N_c 为快充站内充电桩的总数量; T 为全天划分的时段数量。

充电桩满载率是指单位时段内满功率运行的充电桩数量占快充站充电桩总数的比例。由于EV在恒压充电阶段存在功率衰减现象,随着处于恒压充电阶段EV占比的增加,充电桩的满载率随之降低,尤其是在快充站EV数量较多时充电桩的服务能力得不到充分发挥,严重损害了快充站的经济效益。定义快充站满载率 C_{sp} 的计算式为:

$$C_{sp} = \sum_{j=1}^T \frac{N_{m,j} / N_c}{T} \quad (13)$$

式中: $N_{m,j}$ 为时段 j 满功率运行的充电桩数量。

2.4 快充站运营目标函数

从快充站角度出发,其运营目标是在保证EV用户满意度最优的前提下实现快充站的经济效益及充电桩的服务能力最大化。充电桩的服务能力越强,则快充站的充电负荷越高,相应的经济效益越高,故充电桩的服务能力与快充站的经济效益呈正相关。因此,快充站的运营目标函数为:

$$z = aB'_{ep} + bU_{\text{sat}}^{\text{tw}} + cU_{\text{sat}}^{\text{p}} \quad (14)$$

式中: B'_{ep} 、 $U_{\text{sat}}^{\text{tw}}$ 、 $U_{\text{sat}}^{\text{p}}$ 分别为快充站经济效益、EV用户等待时长满意度、充电等效电价满意度的归一化数值; a 、 b 、 c 为权重值。

3 面向EV的差异化服务费激励机制

3.1 考虑快充站运行状态的充电服务费制定方法

本文根据快充站充电设施的充裕度将其分为忙碌、平常、空闲3种运行状态,具体判断标准见附录B式(B1)。本文针对不同快充站的运行状态对充电服务费进行调整,当EV离场时的荷电状态为 $S_{le,i,k}$ 时,不同快充站运行状态下EV_i服务费的确定方法具体叙述如下。

1) 快充站处于忙碌运行状态。

由于为处于恒压充电阶段的EV提供充电服务的充电桩的功率呈指数衰减,则充电桩的时间占用成本呈对数指数上升,因此为了保证快充站的经济效益,对于离场荷电状态超过荷电状态阈值的EV_i而言,设定其充电服务费随充电桩的输出损失进行调整。充电桩的输出损失 L_{loss} 如式(15)所示。

$$L_{\text{loss}} = P_{\text{max}} t_{\text{chg},i,k} - (S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{\text{bat},i} / \eta \quad (15)$$

则用户的充电服务费为:

$$\begin{cases} u_{\text{cc}} = u \\ u_{\text{cv}} = u L_{\text{loss}} / [(S_{le,i,k} - S_{st,i}) C_{\text{bat},i}] + u \end{cases} \quad (16)$$

式中: u 为固定服务费机制下的服务费价格,是一固定常数。

2) 快充站处于平常运行状态。

快充站的平常运行状态基本能实现进站与出站EV数量的动态平衡,此时不对充电服务费进行调

整,即:

$$u_{cc} = u_{cv} = u \quad (17)$$

3)快充站处于空闲运行状态。

当快充站处于空闲运行状态时,会有大量充电桩被闲置,为了提高快充站的经济效益,需通过调低恒压充电阶段的充电服务费,引导用户提高充电需求,但是由于充电后期存在功率衰减现象,会导致充电时间延长,用户的时间成本上升,为了提高用户的响应意愿,需根据用户充电时长的增加逐步提升服务费的调整力度。空闲运行状态下的充电服务费为:

$$\begin{cases} u_{cc} = u \\ u_{cv} = u - 1 + e^{\lambda_1(t_{\text{chg},i,k} - t_{\text{cc},i})} \\ u_{\min} \leq u_{cv} < u \end{cases} \quad (18)$$

式中: u_{\min} 为快充站考虑购电成本和软硬件损耗等因素后可接受的充电服务费下限; λ_1 为空闲运行状态下的服务费衰减指数; $t_{\text{cc},i}$ 为EV $_i$ 结束恒流充电阶段所需时间。

考虑到充电菜单基于用户的不同期望离场荷电状态计算充电等效电价,对式(18)进行如下变换:

$$\begin{cases} u_{cc} = u \\ u_{cv} = u - 1 + \left[\frac{\eta P_{\max}}{\eta P_{\max} - \lambda(S_{\text{le},i,k} - S_{\text{th},i})C_{\text{bat},i}} \right]^{\lambda_1/\lambda} \\ u_{\min} \leq u_{cv} < u \end{cases} \quad (19)$$

3.2 服务费参数的求解方法

由 3.1 节可知,恒压充电阶段的服务费主要由充电时长 $t_{\text{chg},i,k}$ 和空闲运行状态下的服务费衰减指数 λ_1 确定,同时由 1.2 节可知 $t_{\text{chg},i,k}$ 由功率衰减指数 λ 确定,所以本节中对服务费设计中的 λ 和 λ_1 这 2 个参数进行求解。

1)功率衰减指数 λ 。

由于EV的充电过程可分为恒流充电阶段和恒压充电阶段,由式(1)可知:恒流充电阶段的充电功率变化不明显,可视为恒功率;在恒压充电阶段,基于美国科学家 J. A. Mas 提出的蓄电池最佳充电电流理论,此时的充电电流呈指数衰减,最终在满电时达到最小充电电流 I_{\min} ,如式(20)所示。

$$I_{\min} = \alpha I_{\max} = I_{\max} e^{-\lambda(T_m - T_{\text{th}})} \quad (20)$$

$$T_{\text{th}} = \frac{S_{\text{th},i} C_{\text{bat},i}}{\eta P_{\max}} \quad (21)$$

$$\int_{T_{\text{th}}}^{T_m} \eta P_{\max} e^{-\lambda(t - T_{\text{th}})} dt = (1 - S_{\text{th},i}) C_{\text{bat},i} \quad (22)$$

$$e^{-\lambda(T_m - T_{\text{th}})} = 1 - \frac{\lambda(1 - S_{\text{th},i}) C_{\text{bat},i}}{\eta P_{\max}} \quad (23)$$

式中: T_{th} 为EV充电全过程中达到荷电状态阈值所需时长; T_m 为EV完成充电全过程所需时长,可由式(22)和式(23)推导得到。

则结合式(20)~(23)可得:

$$\lambda = \frac{(1 - \alpha) \eta P_{\max}}{(1 - S_{\text{th},i}) C_{\text{bat},i}} \quad (24)$$

式中: α 为常数,表示最小充电电流与最大充电电流的比值,由于充电设施的差异性,其值略有不同,取值范围为 10%~20%。

2)空闲运行状态下的服务费衰减指数 λ_1 。

由式(18)可知,当EV满电时,充电服务费达到下限值,即:

$$u_{\min} = u - 1 + e^{\lambda_1(T_m - T_{\text{th}})} \quad (25)$$

结合式(20)和式(25)可进一步得到:

$$\alpha^{\lambda_1/\lambda} = 1 + u_{\min} - u \quad (26)$$

最终可得到空闲运行状态下的服务费衰减指数 λ_1 为:

$$\lambda_1 = \frac{(\alpha - 1) \eta P_{\max}}{(1 - S_{\text{th},i}) C_{\text{bat},i}} \log_{\alpha}(1 + u_{\min} - u) \quad (27)$$

3.3 动态服务费激励机制

本文通过制定动态服务费激励机制实时根据快充站的运行状态调整EV用户的充电服务费,实现用户需求与快充站需求相匹配,具体流程图见图2。

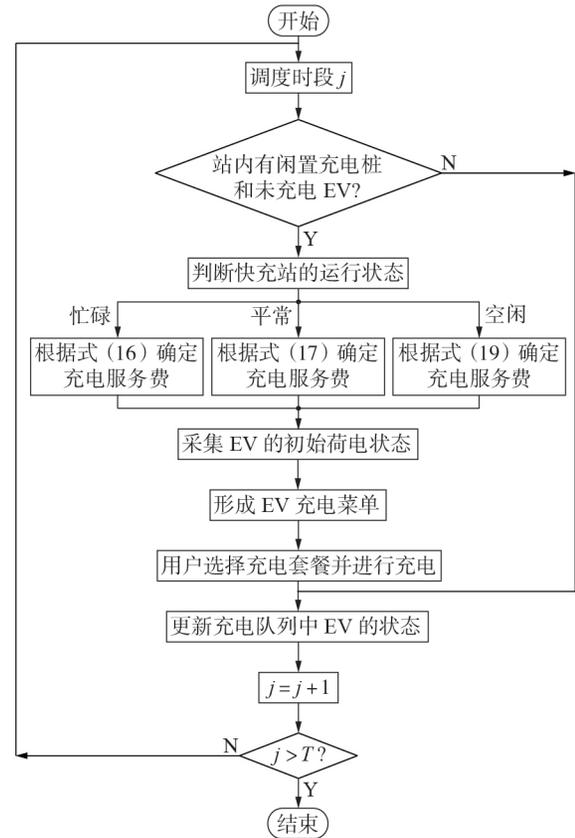


图 2 动态服务费激励机制流程图

Fig.2 Flowchart of dynamic service fee incentive mechanism

快充站以时间间隔 Δt 对EV进行一次调度,每次调度过程中首先对快充站内的闲置充电桩数量及站内等待队列中的EV数量进行统计,若两者均不

为0,则根据附录B式(B1)对快充站当前时段的运行状态进行判断;否则根据式(28)更新充电队列中EV的荷电状态并进入下一调度时段。

$$S_{i,j+1} = S_{i,j} + \frac{\int_0^{\Delta t} \eta P_{\text{chrg},i} dt}{C_{\text{bat},i}} \quad (28)$$

式中: $S_{i,j}$ 、 $S_{i,j+1}$ 分别为EV_i在时段j、j+1的荷电状态。

当站内充电桩与充电EV数量均不为0时,基于快充站的运行状态,分别以实现忙碌运行状态下EV用户的等待时长和快充站的经济效益最优以及平常运行状态和空闲运行状态下快充站的经济效益最优为目标,根据式(16)~(18)对不同快充站运行状态下的服务费进行调整,并根据EV进场时的荷电状态形成充电菜单,引导用户根据快充站的需求决定离场荷电状态,最后快充站对充电队列中的EV进行状态更新并进入下一调度时段。

4 仿真算例

4.1 仿真设置

以高速公路快充站为背景,设置快充站中拥有10台充电桩,每台充电桩的满载功率为60 kW。不同调度时间间隔下本文服务费激励机制、固定服务费机制和分时服务费机制下的仿真结果见附录C。对比结果可知,相较于固定服务费机制、分时服务费机制,不同调度时间间隔下本文所提服务费激励机制的改善效果较为稳定,同时考虑到快充站的充电时间较短,本文选用尺度最小的调度时间间隔 $\Delta t = 1 \text{ min}$,方便快充站实时掌握站内状态和EV状态。本文所提服务费激励机制下快充站购电、售电电价^[16-17]均为0.5元/(kW·h),服务费为0.7元/(kW·h)。文献[18]指出当EV电量告警时,用户将就近选择充电站进行充电,考虑到不同品牌EV的告警电量设置以及用户个人习惯有所差异,本文假设每日进站EV的荷电状态服从(20%, 50%)范围内的均匀分布,荷电状态阈值 $S_{\text{th},i} = 80\%$,到达时间服从泊松分布,充电效率 $\eta = 0.9$,最小充电电流与最大充电电流之比 $\alpha = 15\%$ 。同时在本文所提服务费激励机制下快充站处于平常运行状态、分时服务费机制下平时段以及固定服务费机制下EV用户的期望离场荷电状态服从(70%, 100%)范围内的均匀分布。且假设EV用户均为理性人,100%响应服务费激励机制。

4.2 快充站的经济效益分析

以固定服务费和分时服务费机制作为对比机制,分析本文所提充电服务费机制对快充站经济效益的作用,其中固定服务费机制下的充电服务费为1.0元/(kW·h),分时服务费机制下各时段的服务费见表1。考虑到快充站每日的运维项目基本相同,故快充站的每日维护费用保持稳定,可视为常数,假

设快充站日常运行的软硬件损耗成本为1000元^[19]。不同快充站日服务EV数量下快充站的经济效益如图3所示。

表1 分时服务费机制下的服务费
Table 1 Service fee under time-sharing service fee mechanism

时段	时段	服务费 / [元·(kW·h) ⁻¹]
谷时段	00:00—07:00, 23:00—24:00	0.7
平时段	07:00—08:30, 11:30—18:00	1.0
峰时段	08:30—11:30, 18:00—23:00	1.3

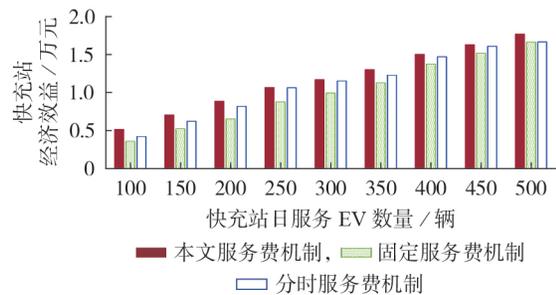


图3 不同服务费机制下快充站的经济效益

Fig.3 Economic benefits of fast charging station under different service fee mechanisms

由图3可知:当快充站日服务EV数量不同时,本文服务费机制下快充站的经济效益最好;固定服务费机制下EV用户的充电需求具有一定的不确定性,所以快充站的经济效益得不到最大化;分时服务费机制可以适当提高快充站的经济效益,但是效果不如本文所提激励机制。不同激励机制下快充站的经济效益存在差异的根本原因在于:在全天的各时段本文服务费机制可以实时监测快充站的运行状态,在快充站服务的EV较少时,可通过降低充电服务费,引导用户提高自身的充电需求,在快充站服务的EV较多时,可通过提高充电服务费,引导用户降低充电需求,最终达到提高快充站经济效益的目的;而分时服务费机制和固定服务费机制难以对充电站的运行状态进行实时监控,不能实现对EV用户充电行为的实时引导和差异化管理,所以快充站的经济效益达不到最大化。

4.3 EV用户的满意度分析

选取快充站日服务EV数量为100、300、500辆这3种情况(分别对应快充站空闲时段、平常时段、忙碌时段占比较高)对EV用户的满意度进行分析。在用户充电等效电价方面,充电等效电价越低,则用户的满意度越高。采用不同服务费机制时不同充电等效电价下的EV数量占比如图4所示。由图可知:当快充站日服务EV数量为100辆时,本文服务费机制下的充电等效电价基本保持在1.5元/(kW·h),比固定服务费机制和分时服务费机制下的充电等效

电价更加经济, EV 用户的满意度更高;随着快充站日服务 EV 数量的增加,本文服务费机制下用户的充电等效电价逐渐向固定服务费机制下的结果靠近,相较于固定服务费机制和分时服务费机制,其在充电等效电价方面的优势逐渐降低。

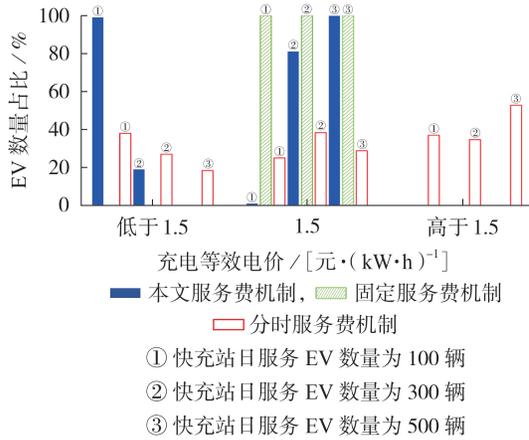


图 4 不同充电等效电价下的 EV 数量占比

Fig.4 Proportion of EV quantity under different equivalent charging electricity prices

同时考虑到在快充站进行充电的 EV 用户均为时间敏感型用户,对不同等待时长下的 EV 数量占比进行统计,结果如图 5 所示。由图可知:当快充站日服务 EV 数量为 100 辆时,由于快充站全天较多时段处于空闲状态,各服务费机制下 EV 进站后基本全部能够立即进行充电;随着快充站日服务 EV 数量的增加,快充站处于忙碌状态的时段增加, EV 等待时长增加,其中本文服务费机制下用户等待时长的增加速度较慢,均能保持在 30 min 内进行充电,固定服务费机制和分时服务费机制下用户等待时长的增加速度较快,当 EV 数量较多时甚至有部分 EV 由于等待时间过长始终未能接入充电系统,从而造成了部分客户流失。可见,本文服务费机制在提高用户满意度、降低客户流失概率方面起到了明显的作用。

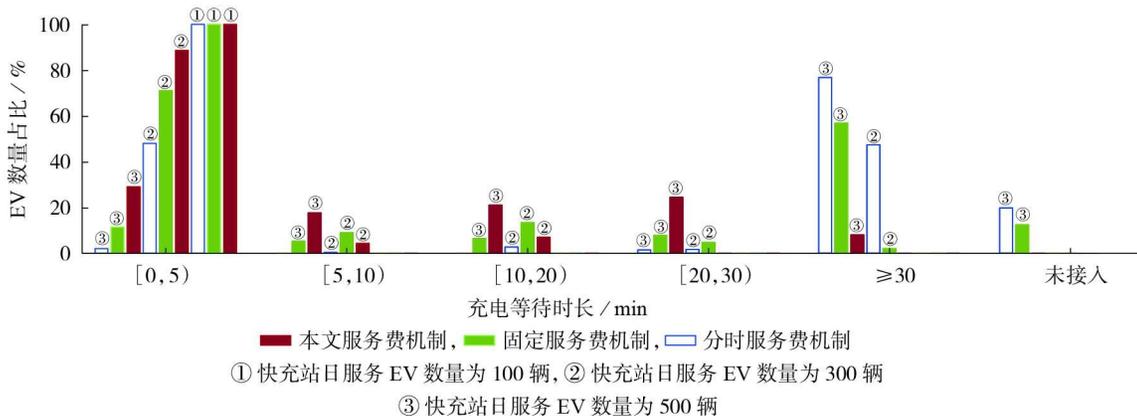


图 5 不同用户等待时长下的 EV 数量占比

Fig.5 Proportion of EV quantity under different user waiting times

4.4 充电桩的服务能力分析

本节在 4.2 节的基础上,根据 2.3 节中对充电桩服务能力的定义对快充站日服务 EV 数量为 100、300、500 辆这 3 种情况下 10 台充电桩的充电服务情况进行分析。

当快充站日服务 EV 数量为 100 辆时,充电桩的工作率和满载率见附录 D 图 D1,此时快充站一天处于空闲状态的时段较多,快充站的经济效益与充电桩的工作率直接相关。由图 D1(a)可以看出,相较于固定服务费机制和分时服务费机制,本文服务费机制下充电桩的工作率明显较高,因此本文服务费机制对快充站的经济效益有着明显的提升作用。由图 D1(b)可以看出,3 种服务费机制下充电桩的满载率基本保持一致,这是因为该情况下快充站日服务 EV 数量较少,所有 EV 的等待时长均保持在 5 min 之内, EV 之间基本不存在充电竞争关系,所以 3 种机制下的 EV 基本均可完成恒流充电阶段,充电桩满载率也基本保持一致。

当快充站日服务 EV 数量为 300 辆时,充电桩的工作率和满载率见附录 D 图 D2,此时快充站一天处于平常状态的时段较多。由图可知:本文服务费机制下可激励的 EV 用户数量较少,充电桩的工作率和满载率与固定服务费机制下的差别不大;在分时电价服务费机制下,由于峰、平、谷时段占比相同,最终激励呈现效果与固定服务费机制的效果基本一致。

当快充站日服务 EV 数量为 500 辆时,充电桩的工作率和满载率见图 6,此时快充站一天处于忙碌状态的时段较多,充电桩基本全部处于工作状态。由图 6 可知,3 种服务费机制下充电桩的工作率基本保持一致,均集中在 90% 以上。可见,在快充站日服务 EV 数量较多的情况下,快充站的经济效益与充电桩的满载率有直接关系,提高充电桩的满载率可以引导 EV 用户不在快充站充电设施紧张时段进行恒压充电,保证充电桩以最大输出功率运行,降低了充电桩的时间占用成本,提高了快充站的经济效益。

相较于固定服务费机制和分时服务费机制,本文服务费机制可以在快充站日服务EV数量较多时明显提升充电桩的满载率。

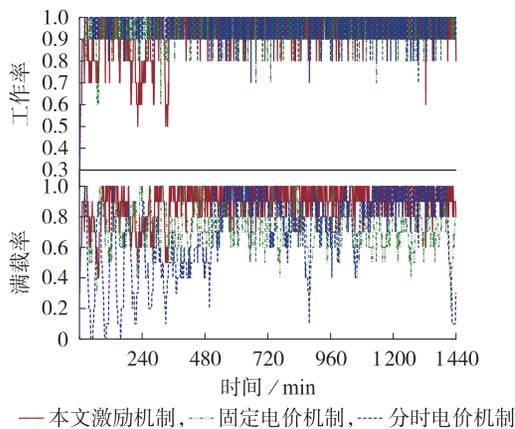


图6 快充站日服务EV数量为500辆时充电桩的服务能力

Fig.6 Service capacity of charging piles when fast charging station serves 500 EVs per day

5 结论

本文在考虑充电设施裕度的前提下,提出了快充站差异化激励方法,对快充站不同运行状态下接入的EV提供差异化充电菜单,站内忙碌时提高恒压充电阶段的充电服务费以引导用户仅在恒功率阶段充电,站内空闲时降低恒压充电阶段的充电服务费以引导EV在功率衰减阶段充电,从而实现快充站服务能力最大化的目标。通过仿真算例进行验证,结果表明:相较于固定服务费机制和分时服务费机制,采用本文服务费机制能够更好地使用户需求匹配快充站的服务能力,对不同快充站日服务EV数量下快充站的经济效益、EV用户的满意度以及充电设施利用率等均起到了明显的改善作用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孟锦鹏,向月,顾承红,等. 面向可靠性提升的电动汽车充电基础设施协同优化规划[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):36-44.
MENG Jinpeng, XIANG Yue, GU Chenghong, et al. Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 36-44.
- [2] PANDŽIĆ H, BOBANAC V. An accurate charging model of battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1416-1426.
- [3] XIE R, WEI W, WU Q W, et al. Optimal service pricing and charging scheduling of an electric vehicle sharing system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 78-89.
- [4] LIU L J, LIU J C, DENG H S, et al. Potential analysis of demand response based on peak and valley time price[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1070 / 1071 / 1072: 1506-1510.
- [5] 张潇,栗然,马涛,等. 基于主从博弈和贪心策略的含电动汽车主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 103-110.
ZHANG Xiao, LI Ran, MA Tao, et al. Stackelberg game and greedy strategy based optimal dispatch of active distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 103-110.
- [6] 洪奕,刘瑜俊,徐青山,等. 基于积分制和分时电价的电动汽车混合型精准需求响应策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 106-116.
HONG Yi, LIU Yujun, XU Qingshan, et al. Hybrid targeted demand response strategy of electric vehicles based on integral system and time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 106-116.
- [7] CORDING E H. Online mechanism design for electric vehicle charging[J]. Autonomous Agents & Multiagent Systems, 2011, 5(2): 811-818.
- [8] GHOSH A, AGGARWAL V. Control of charging of electric vehicles through menu-based pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5918-5929.
- [9] 李斌,刘畅,陈慧妙,等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2623-2630.
LI Bin, LIU Chang, CHEN Huimiao, et al. Coordinated charging of plug-in electric buses in fast charging stations based on mixed-integer programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2623-2630.
- [10] 陈立兴,黄学良. 高速公路充电站电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 112-117, 126.
CHEN Lixing, HUANG Xueliang. Ordered charging strategy of electric vehicles at charging station on highway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 112-117, 126.
- [11] 党杰,汤奕,宁佳,等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [12] FRAILE-ARDANUY J, CASTANO-SOLIS S, ÁLVARO-HERMANA R, et al. Using mobility information to perform a feasibility study and the evaluation of spatio-temporal energy demanded by an electric taxi fleet[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 59-70.
- [13] SERHAN H A, AHMED E M. Effect of the different charging techniques on battery life-time: review [C] // 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE). Aswan, Egypt: IEEE, 2018: 421-426.
- [14] GAO Y Z, ZHANG X, CHENG Q Y, et al. Classification and review of the charging strategies for commercial lithium-ion batteries[J]. IEEE Access, 2019, 7: 43511-43524.
- [15] 范春梅,李华强,贾建民,等. 等待时间、感知经济损失与服务满意度之间的关系研究:以出租车司机加气排队为例[J]. 管理评论, 2014, 26(11): 99-105.
FAN Chunmei, LI Huaqiang, JIA Jianmin, et al. The relationships among waiting time, perceived economic loss and service satisfaction: a study of taxi drivers' waiting for gas[J]. Management Review, 2014, 26(11): 99-105.
- [16] 王俊杰,贾雨龙,米增强,等. 基于双重激励机制的电动汽车备用服务策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 68-76.
WANG Junjie, JIA Yulong, MI Zengqiang, et al. Reserve service strategy of electric vehicles based on double-incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 68-76.
- [17] 李明,邓友均,杨洪明,等. 分时电价下电动汽车路径选择和充电导航策略[J]. 南方电网技术, 2016, 10(8): 61-66.
LI Ming, DENG Youjun, YANG Hongming, et al. Electric vehi-

cle route selection and charging navigation strategy considering time-of-use price[J]. Southern Power System Technology, 2016,10(8):61-66.

- [18] WEI Z, LI Y, CAI L. Electric vehicle charging scheme for a park-and-charge system considering battery degradation costs [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(3): 361-373.
- [19] 孟旭瑶, 张维戈, 鲍谚, 等. 考虑充电功率的电动汽车快充站充电设施优化配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7):28-34.
MENG Xuyao, ZHANG Weige, BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):28-34.

作者简介:



李 飞

李 飞(1982—),男,河北石家庄人,高级工程师,博士研究生,研究方向为电力系统营销;

梁宝全(1971—),男,天津人,高级工程师,硕士,研究方向为营销管理技术;

张旭东(1974—),男,河北石家庄人,高级工程师,研究方向为电力系统营销;

王鸿奎(1986—),男,河北石家庄人,高级工程师,硕士,研究方向为电能计量与电能采集技术(E-mail:down_in_river@163.com)。

(编辑 陆丹)

Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station

LI Fei^{1,2}, LIANG Baoquan², ZHANG Xudong², WANG Hongxi², SUN Yi¹, MU Mingliang¹, LI Zekun¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Marketing Service Center of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Fast charging station is an important construction direction under the large-scale popularization of EVs (Electric Vehicles), and the utilization of charging facilities in the station directly determines the operating income of charging piles. The power attenuation of EVs in the late charging period will cause the cluster effect of slow power operation in the station, which will affect the overall profit efficiency of the fast charging station. Based on this, according to the different margins of charging facilities in the station, the differentiated service fee incentive mechanism of EVs is proposed to guide users to change their charging needs, and to improve both the economic benefit of fast charging station and utilization rate of charging piles while ensuring user satisfaction degree, so as to maximize the service capacity of fast charging station. A simulation example is given to verify that the proposed adaptive dynamic incentive mechanism can effectively improve the economic benefit and user satisfaction degree of the fast charging station.

Key words: electric vehicles; fast charging stations; margin of charging facility; power attenuation; differentiated incentive; economic benefit; user satisfaction degree

(上接第 30 页 continued from page 30)

Distributed voltage control of distribution network considering large-scale energy storage

WANG Xiao¹, HE Yigang¹, MA Hengrui², LIU Xiaoyan¹, ZHANG Hui¹, GAO Wenzhong³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. New Energy (Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. Department of Engineering and Computer Science, University of Denver, Denver 80208, USA)

Abstract: In order to achieve the large-scale utilization of energy storage resources, the cooperative control framework is constructed for large-scale energy storage devices, and the voltage control method of distribution network is proposed based on distributed optimization method. The proposed method uses the improved ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) to introduce the artificial consensus constraint in the dual problem of the optimization model, and only needs the neighboring communication to accomplish fully distributed charging and discharging of energy storage devices and the voltage support of distribution network. Simulation case based on IEEE 33-bus system verifies the effectiveness of the proposed method. Simulative results show that the distributed cooperative control can quickly converge to the optimal solution of the optimization problem, which benefits to suppress the impacts of the fluctuation of renewable energy sources on the power grid, and guarantees the security and stability of grid voltage with desired scalability and applicability.

Key words: large-scale energy storage; ADMM; distribution network; voltage control; distributed control

附录 A

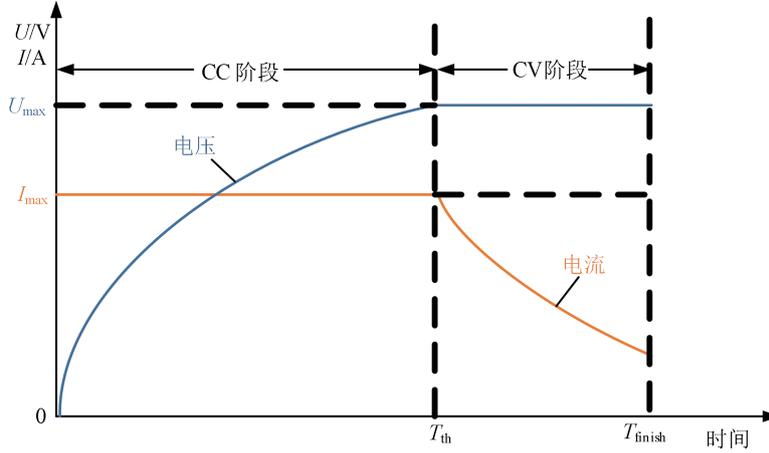


图 A1 锂电池 CC-CV 充电过程示意图

Fig.A1 Schematic diagram of lithium battery CC-CV charging process

附录 B

本文通过将当前时段已有以及未来一段时间内可能到达的 EV 数量与充电设施数量进行对比，确定快充站的运行状态，如式 (B1) 所示。

$$\begin{cases} N_s \geq k_2 N_c & \text{忙碌} \\ k_1 N_c \leq N_s < k_2 N_c & \text{平常} \\ N_s < k_1 N_c & \text{空闲} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

式中： N_c 为充电设施数量； N_s 为快充站当前时段已有以及未来一段时间内到达的 EV 数量； k_1 、 k_2 为弹性系数，用于确定快充站在 3 种运行状态下等待队列队长边界，且有 $k_1 < k_2$ 。

在快充站的不同运行状态下，快充站的目标函数涉及各类指标之间具有明显的关联性。处于忙碌状态时，站内 EV 数量较多，用户等待时间延长，为了缩短用户的等待时间，快充站会通过调高恒压阶段的充电服务费，引导用户降低充电时长和充电需求，充电桩使用率和满载率上升，快充站经济效益得到提升；处于空闲状态时，站内 EV 数量较少，用户等待时间很短，为了引导用户提高充电时长和充电需求，快充站调低恒压阶段充电服务费，充电率满载率和使用率上升，快充站总运行负荷上升，但是考虑到用户充电服务费的降低，用户充电等效电价和快充站经济效益呈正关系。

附录 C

当前 EV 有序调度研究中使用频率最高的 EV 调度时间间隔为 1、5、15 min。为了研究不同调度时间间隔下本文服务费激励机制相较于固定服务费机制和分时服务费机制的优势，对不同日服务 EV 数量、不同调度时间间隔下 3 种服务费机制之间的优化效果进行仿真对比。

对比情形 1：本文服务费机制在快充站经济效益方面相较于分时服务费机制的对比效果如式 (C1) 所示。

$$\zeta_{\text{tim}} = \frac{R_{\text{self}}^{\text{ep}} - R_{\text{tim}}^{\text{ep}}}{R_{\text{self}}^{\text{ep}}} \times 100\% \quad (\text{C1})$$

对比情形 2：本文服务费机制在快充站经济效益方面相较于固定服务费机制的提升效果如式 (C2) 所示。

$$\zeta_{\text{fix}} = \frac{R_{\text{self}}^{\text{ep}} - R_{\text{fix}}^{\text{ep}}}{R_{\text{self}}^{\text{ep}}} \times 100\% \quad (\text{C2})$$

式中： R_{self}^{op} 、 R_{tim}^{op} 、 R_{fix}^{op} 分别为本文服务费、分时服务费以及固定服务费激励机制下快充站的经济效益。

仿真结果如图 C1 所示。快充站日服务 EV 为 100、300、500 辆时，快充站一天内大部分时间段分别处于空闲、平常、忙碌状态。由图 C1 可得出以下结论：①在快充站日服务不同 EV 数量时，在各种充电调度时间间隔下，相较于分时服务费和固定服务费激励机制，本文服务费激励机制对快充站经济效益提升作用更加明显；②快充站调度时间间隔增加，会导致调度精度下降，损害快充站的经济效益。可见，本文服务费激励机制相较于分时服务费和固定服务费激励机制的对比提升效果整体上呈小幅度上升趋势，说明随着调度时间间隔增加，在快充站经济效益整体下滑的情况下，本文服务费激励机制具有更好的抗衰减能力。

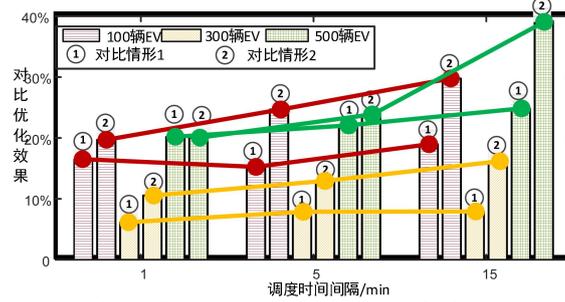


图 C1 快充站日服务 300 辆 EV 时充电桩服务能力

Fig.C1 Service capacity of charging piles when fast charging stations serve 300 EVs per day

附录 D

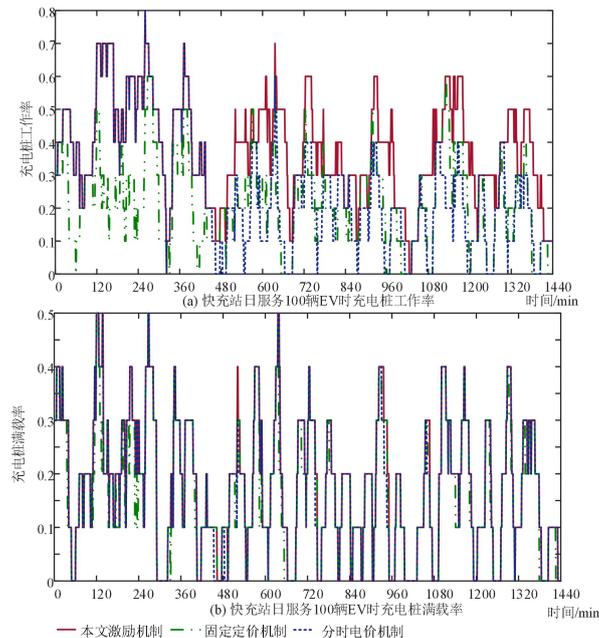


图 D1 快充站日服务 100 辆 EV 时充电桩服务能力

Fig.D1 Service capacity of charging piles when fast charging stations serve 100 EVs per day

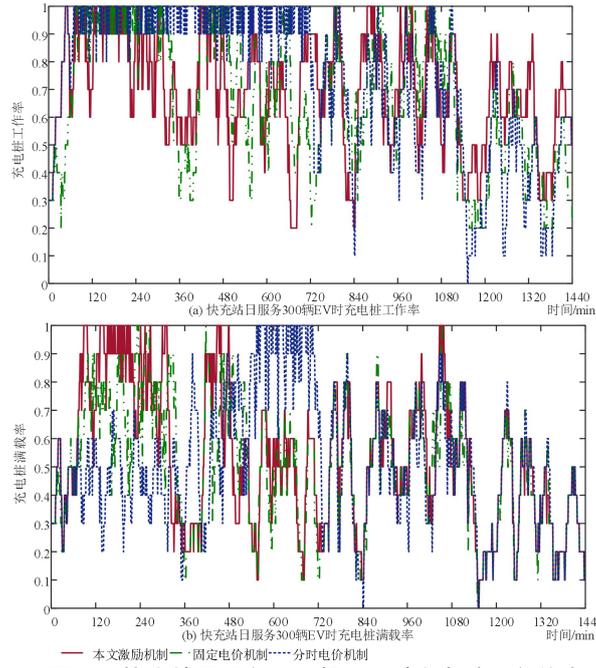


图 D2 快充站日服务 300 辆 EV 时充电桩服务能力

Fig.D2 Service capacity of charging piles when fast charging stations serve 300 EVs per day